

ステンレス鋼の高温疲労・クリープ相互作用下での破壊に関する研究

著者	坂田 寛
号	690
発行年	1978
URL	http://hdl.handle.net/10097/9426

氏 名	さか 坂 田 ひろし 寛
授 与 学 位	工 学 博 士
学 位 授 与 年 月 日	昭 和 54 年 3 月 27 日
学 位 授 与 の 根 拠 法 規	学 位 規 則 第 5 条 第 1 項
研 究 科 , 専 攻 の 名 称	東 北 大 学 大 学 院 工 学 研 究 科 (博 士 課 程) 機 械 工 学 第 二 専 攻
学 位 論 文 題 目	ス テ ン レ ス 鋼 の 高 温 疲 勞 ・ ク リ ー プ 相 互 作 用 下 で の 破 壊 に 関 す る 研 究
指 導 教 官	東 北 大 学 教 授 横 堀 武 夫
論 文 審 査 委 員	東 北 大 学 教 授 横 堀 武 夫 東 北 大 学 教 授 渥 美 光 東 北 大 学 教 授 川 崎 正 東 北 大 学 教 授 三 戸 暁 東 北 大 学 教 授 萱 場 孝 雄

論 文 内 容 要 旨

第 1 章 緒 論

近時、原子力構造機器、各種圧力容器などの高温強度や高温における破壊防止の問題に関連して、高温強度設計基準の確立が緊要となってきたが、使用条件から考えて、その中心は、高温疲労・クリープの相互作用下での、即ち、両者の重畳による破壊問題である。しかし、高温疲労・クリープの重畳下での破壊寿命およびき裂成長速度の予知に関しては、従来、個々の破壊力学パラメータで表わしており、破壊力学パラメータ、温度および保持時間などによって与える表示式はいまだ提出されていない。しかも、従来、高温でのき裂成長速度の測定・観察は、空气中または低真空中で行なわれたり、また、その都度試験機の運転を中断して行っており、環境や試験中断の影響のおそれがある。そこで、本論文では、オーステナイト系ステンレス鋼（SUS 304）を用いて、真空中（ 10^{-5} mmHg）で、高温疲労・クリープ相互作用下でのき裂成長速度および成長の形態的様相を、試験運転を中止することなく連続観察できるようにして実験を行ない、それらの実験結果をもとにして、き裂成長速度を、保持時間、破壊力学パラメータとしての応力拡大係数、公称応力、運動論的パラメータとしての温度などの関数として予知できる表示式を提出した。

第2章 寿命則に関する研究

本章では、一定保持時間を有する高温疲労・クリープの重畳の各々および高温クリープ、高温疲労の各条件下での実験を行ない、破断寿命および寿命則などについて調べた。その結果、高温疲労・クリープの重畳での寿命則は、非線形損傷則に近い傾向を持つ特徴的な曲線で表わされることがわかった。

第3章 き裂の成長挙動

本章では、高温疲労・クリープの相互作用下において、き裂の発生・成長および破断にいたるまでの過程を連続観察・測定する実験を行ない、き裂成長速度の支配力学量について比較・検討した。同時に、初期切欠きの形状変化の様相を連続観察した。その結果、第Ⅱ段階のき裂成長速度は、応力拡大係数、公称応力、公称実断面応力ないし修正J積分の何れか単独だけでは表わすことはできないことを示した。また、負荷直後切欠き形状は鈍化するが、き裂発生時点では、温度、公称応力、保持時間などの条件に殆んど無関係に同一であることがわかった。

第4章 有限要素法による解析

本章では、切欠き底からき裂が発生・成長する際の刻々の応力拡大係数 K_{In} を、切欠きの形状効果を考慮して有限要素法により解析した。その結果、この応力拡大係数 K_{In} と従来の応力拡大係数 K_{IA} との比を、リガメント長さで無次元化した時々刻々のき裂長さに対して表わすと、図1のようになり、応力拡大係数 K_{In} は、(1)式に示す簡単なかつ精度の良い近似式で与えられることがわかった。

$$\frac{K_{In}}{K_{IA}} = 1 - 0.4 e^{-47.3 (a^*/(w-a_0))} \quad (1)$$

さらに、切欠き底近傍および切欠き底から発生したき裂近傍の応力解析を行なった。

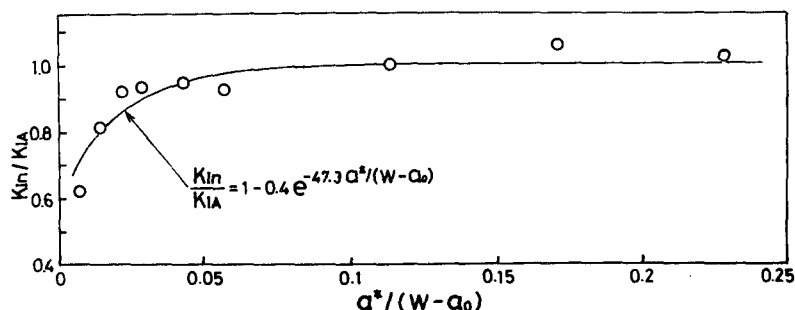


図1. 応力拡大係数の比 K_{In}/K_{IA} と無次元化き裂長さとの関係

第5章 き裂成長速度の表示式の導出

本章では、第4章で切欠きの形状効果を考慮して有限要素法により求めた応力拡大係数 K_{In} を用いて、第3章での一連の実験から得られた高温疲労・クリープの相互作用下におけるき裂成長速度を表わした。その一例を図2に示す。その結果、き裂成長速度は図3に示すようにアレニウス型の温度依存性を示すことがわかり、また、き裂成長に対する見かけの活性化エネルギーと応力拡大係数 K_{In} の関係は、図4に示すようになり、クリープから保持時間が減少して疲労にいた

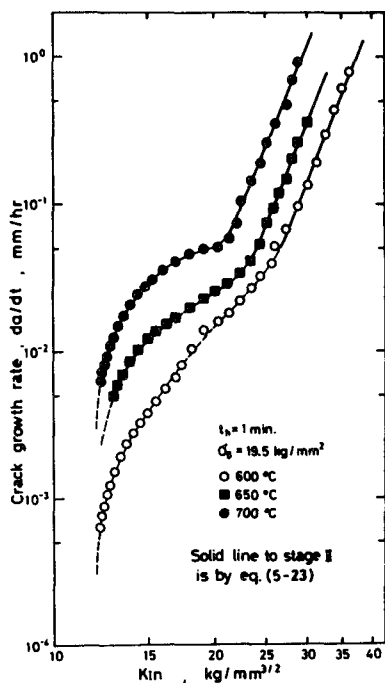


図2. き裂成長速度と温度および応力拡大係数 K_{In} との関係

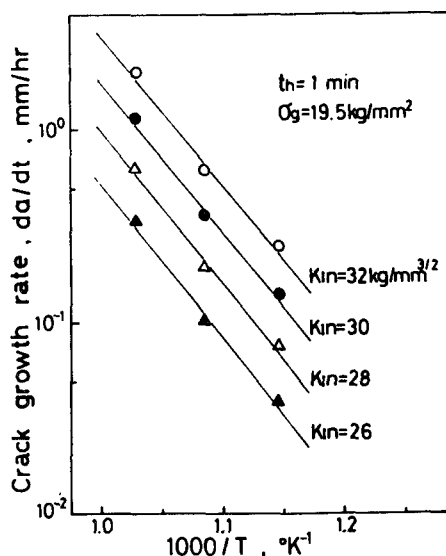


図3. き裂成長速度と温度との関係

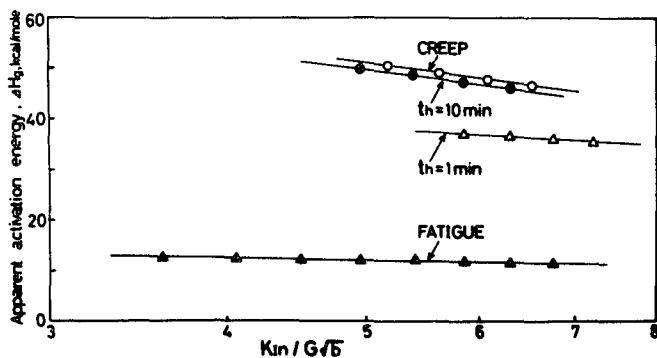


図4. 活性化エネルギーと応力拡大係数との関係

るにつれて、律速過程が変化して行くことがわかった。そして、き裂成長速度の応力拡大係数 K_{In} 、公称応力 σ_g および温度との間の実験関係式をもとにして、さらに、第3章における一連の実験結果との対比・検討の結果、応力拡大係数 K_{In} 、公称応力 σ_g および温度の関数として、応力拡大係数 K_{In} および公称応力 σ_g については指数関数、温度に対してアレニウス形をもつ、次のようなき裂成長速度の実験的表示式を導いた。

$$\frac{da}{dt} = B_t \sigma_g^m K_{In}^{n_1} \exp \left\{ - \frac{\Delta f_1 - \Delta f_2 \ell_n (K_{In} / G \sqrt{b})}{RT} \right\} \quad (2)$$

ここに、 R はガス定数、 T は絶対温度、 G は剛性率、 b はバーガースベクトルであり、 B_t 、 m 、 n_1 、 Δf_1 および Δf_2 は保持時間に依存する定数である。さらに、保持時間 t_h をも含めた関数として、次のようなき裂成長速度の一般的表示式を導いた。

$$\begin{aligned} \frac{da}{dt} = & 2.99 \times 10^3 \cdot 10^{35.5 (10^{-0.544t_h} - 1.2e^{-0.766t_h})} \cdot \\ & \sigma_g^{5.64 (1-e^{-2.1t_h})} \cdot K_{In}^{\left\{ \frac{181.1}{(t_h + 2.2)^{2.5}} - 21.5e^{-1.48t_h} \right\}} \cdot \\ & \exp \left\{ - \frac{(1 - 0.85e^{-0.45t_h}) (7.82 - 1.68 \ell_n \frac{K_{In}}{G \sqrt{b}})}{10^{-4} RT} \right\} \quad (3) \end{aligned}$$

さらに、実用上問題となる保持時間の範囲では、次のようにさらに簡単に表わせることがわかった。

$$\frac{da}{dt} = 2.99 \times 10^3 \sigma_g^{5.64} \exp \left\{ - \frac{(1 - 0.85e^{-0.45t_h}) (7.82 - 1.68 \ell_n \frac{K_{In}}{G \sqrt{b}})}{10^{-4} RT} \right\} \quad (4)$$

第6章 き裂の発生・成長および破断の過程の顕微鏡学的観察

高温疲労・クリープの相互作用下でのき裂の発生および成長過程についての顕微鏡観察は、従来殆んど知見されない。そこで、本章ではこれについて調べた。その結果、切欠き先端近傍の引張り軸に垂直な粒界に発生した空泡から形成された微視き裂が成長して、これが主き裂となることが、次に、その主き裂先端近傍に発生した微視き裂が成長して、主き裂と連結することによって、き裂が成長する機構であることを明らかにした。

第7章 結 論

本章は本研究で得られた結論である。

審 査 結 果 の 要 旨

高温構造物において、高温強度設計基準の確立が緊要とされている。しかし、その中心となる高温疲労・クリープ重畳下でのき裂成長速度を予知できる表示式は、応力拡大係数のような単一の力学量によって表わす試み以外に、ほとんど提出されていない。本論文は高温構造部材用ステンレス鋼について高温疲労・クリープ相互作用下でのき裂成長速度に関する系統的研究を行い、その一般的表示式ならびに多くの重要な知見を得たもので全文7章よりなる。

第1章は緒論であり、従来の研究の展望、本研究の意義と目的を述べている。

第2章では高温疲労・クリープ相互作用下での破壊の研究のための試作装置によって、寿命則に関する実験を行い、特徴的な非線形曲線を得ている。また、繰返し寿命と繰返し速度との間に指数関係式を得ている。

第3章では上述の装置を用いて、温度、破壊力学的パラメーターとしての応力拡大係数、公称応力、実断面応力、修正J積分のそれぞれと、き裂成長速度との関係を実験的に求めている。これらの結果から、き裂成長速度と応力拡大係数の両対数関係は室温における疲労の場合と同様な3段階からなる特性曲線をしめすこと、き裂成長速度は、上記破壊力学的パラメーターの何れか単独だけによっては表わすことができないこと、下限界応力拡大係数は温度にはほとんど依存しないことなど新しい知見を得ている。

第4章では負荷直後から切欠き形状は鈍化するが、き裂発生時点では、温度、公称応力、保持時間などにはほとんど無関係に同一となることを見出している。さらに、有限要素法により、切欠き底から発生するき裂成長の際の刻々の応力拡大係数を簡単かつ精度のよい近似式で与えている。また、き裂長さが切欠き底部残余長さのほぼ5%以上になれば等価き裂の考えを適用しても差支えないことも明確にした。

第5章では、第3章、第4章で得た結果を用いて、単独高温クリープおよび高温疲労の場合をふくめて、第2段階でのき裂成長速度を応力保持時間、温度、破壊力学的パラメーターとしての実際の応力拡大係数および公称応力の関数として表示する式を提出している。き裂成長速度はアレニウス形であり、律速過程の活性化エネルギーの値はほぼ妥当なものであり、クリープから保持時間が減少して疲労にいたるにつれて律速過程が変化していくことを示唆している。

第6章はき裂の発生・成長および破断にいたる過程の顕微鏡的観察による研究であって、切欠き近傍の粒界に発生した空泡から形成された微視き裂が成長して、これが主き裂となること、つぎにその主き裂先端近傍に発生する微視き裂が成長して主き裂と連結することによってき裂が成長する機構であることを明らかにしている。第7章は結論である。

以上要するに、本論文は高温構造部材用ステンレス鋼について、高温疲労・クリープの相互作用下でのき裂成長速度を応力保持時間、温度、破壊力学パラメーターとしての実際の応力拡大係数および公称応力の関数として表示した式を提出しただけでなく、多くの新しい重要な知見を与えたものであり、機械工学に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は工学博士の学位論文として合格と認める。